УДК 681.518

А.А. Шептура, Е.Ю. Кузичкина
Институт информатики и искусственного интеллекта
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, Украина
Украина, 83050, г. Донецк, пр. Б. Хмельницкого, 84

Эволюционный алгоритм для решения задачи автоматизации формирования транспортных маршрутов

A.A. Sheptura, K.U. Kuzichkina
Institute of Informatics and Artificial Intelligence
of Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine
Ukraine, 83050, c. Donetsk, B. Khmelnitskiy st., 84

Evolutionary Algorithm for Solving the Problem of Automated Transport Routes

О.О. Шептура, К.Ю. Кузічкіна
Інститут інформатики і штучного інтелекту
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Донецьк, Україна
Україна, 83050, м. Донецьк, пр. Б. Хмельницького, 84

Еволюційний алгоритм для рішення задачі автоматизації формування транспортних маршрутів

В данной статье рассматривается одна из актуальных проблем, а именно повышение эффективности организации процесса доставки заказов путем автоматизации планирования и управления транспортных маршрутов. Предлагается эволюционный алгоритм, базирующийся на динамической аналитической модели, позволяющий при прогнозе показателей транспортных маршрутов учитывать изменение дорожно-транспортной ситуации и характеристик процесса доставки заказов, что значительно позволит повысить эффективность планирования транспортных маршрутов.
Ключевые слова: автоматизация, транспортная задача, эволюционный алгоритм, оптимизация, маршруты.

This article discusses one of the pressing problems, which is namely improving the organization of the delivery orders by automated planning and management of transport routes. Evolutionary algorithm based on dynamic analysis model, which allows taking into account changes in road traffic conditions and characteristics of the delivery orders at the forecast performance of transport routes, is proposed. This algorithm will improve the planning of transport routes significantly.
Key words: automation, transportation problem, evolutionary algorithm, optimization, routes.

У даній статті розглядається одна з актуальних проблем, а саме підвищення ефективності організації процесу доставки замовлень шляхом автоматизації планування та управління транспортних маршрутів. Пропонується еволюційний алгоритм, який базується на динамічній аналітичної моделі дозволяє при прогнозі показників транспортних маршрутів враховувати зміну дорожньо-транспортної ситуації і характеристик процесу доставки замовлень, що значно дозволить підвищити ефективність планування транспортних маршрутів.
Ключові слова: автоматизація, транспортна задача, еволюційні алгоритми, оптимізація, маршрути.

Введение

Современные экономические условия требуют повышения эффективности функционирования всех субъектов хозяйственной деятельности, в том числе предприятий, работающих в области дистрибуции товаров и осуществляющих доставку заказов своим клиентам. Как показывают проводимые исследования, совокупные логистические издержки на доставку заказов составляют до 50% от общей суммы затрат таких предприятия [1]. Одним из путей сокращения логистических затрат является формирование оптимальных транспортных маршрутов.

Задачи оптимизации транспортных маршрутов рассмотрены достаточно большим числом исследователей, среди них работы Ю.В. Неруша, Б.Л. Геронимуса, А.К. Покровского и др. [2-4]. Предложенные в этих работах модели являются статическими, требуют наличия полной информации о перевозках.

В настоящее время на рынке информационных технологий наибольшее распространение получили следующие системы управления грузоперевозками: Network Analyst, ANTOR LogisticsMaster и «Диспетчер» [5-7].

Как показывает анализ, в основе работы перечисленных систем положены алгоритмы поиска кратчайшего пути, к которым относятся алгоритмы Дейкстры, Левита, Уоршела-Флойда, генетические алгоритмы и другие. Общим недостатком этих подходов является отсутствие динамической модели, позволяющей учитывать нестационарность дорожно-транспортной ситуации и процесса обслуживания транспортных средств в точках останова маршрута.

На практике при решении задачи планирования транспортных маршрутов в крупных городах необходимо учитывать динамику изменения дорожно-транспортной ситуации, принимать решения в условиях неполной информации и большой размерности задачи. Поэтому исследования в области автоматизации процесса формирования транспортных маршрутов являются актуальными.

Постановка задачи

Объектом исследования является процесс доставки заказов в задаче автоматизации планирования транспортных маршрутов.

Предметом исследования выступают математические модели процесса доставки заказов.

Целью данного исследования является разработка эволюционного алгоритма для формирования транспортных маршрутов, позволяющего учесть изменение дорожно-транспортной ситуации при планировании маршрутов.

Аналитические методы решения неприменимы к решению задачи оптимального формирования маршрутов, в силу ее большой размерности и высокой вычислительной сложности. Так как при оперативном управлении процессом доставки важен показатель времени получения решения, то уместно использование приближенных методов решения, в частности, аппарата эволюционных алгоритмов, которые дают решение, близкое к оптимальному за небольшой период времени.

Транспортная задача с ограничением по времени описывается следующим образом. Имеются некоторое количество транспортных средств, один склад и некоторое количество клиентов. Задача заключается в поиске эффективного маршрута для транспортных средств, обслуживающих определенное количество клиентов. При этом все маршруты должны начинаться и заканчиваться на складе.

Для данной задачи определены цели (в порядке убывания их приоритета):

а) минимизировать суммарный пробег автопарка обслуживания всех клиентов;

б) минимизировать суммарные затраты топлива;

в) минимизировать общее время выполнения маршрутов транспортными средствами.

Рассмотрим формирование приведенных критериев.

Суммарный пробег автопарка за период определяется как сумма пробегов всех транспортных средств парка. Пробег авто является суммой пробегов по всем выполненным им маршрутам за период. Пробег по маршруту составляется как сумма пробегов по транспортным путям, соединяющим пункты доставки. Пробег R по дороге является функцией времени. Суммарный пробег автопарка представлен выражением следующего вида:

$$R = \sum_{i=1}^{ka}\sum_{j=1}^{clm}\sum_{l=1}^{clp}\sum_{k=0}^{M}(\upsilon^{i}_{j\,l,l+1}(t_k)\cdot X^{i}_{j\,l,l+1})\cdot h \longrightarrow \min_{X}, \qquad (1)$$

где $\upsilon^{i}_{j\,l,l+1}(t_k)$ – скорость движения i-го автомобиля по j-му маршруту с пункта l в $(l+1)$;

$X^{i}_{j\,l,l+1}$ – переменные, принимающие значения $\{0,\ 1\}$, что означает: 1 – i-й автомобиль движется от вершины l к вершине $l+1$ при выполнении j-го маршрута, 0 – при отсутствии движения.

clm – максимальное количество маршрутов, обслуженных i-м автомобилем за период времени T определяется как максимум целой части отношения:

$$clm = \max_{j}\left\{\left[\frac{T}{\min\limits_{g}\left\{Tm^{j}_{g}\right\}}\right]\right\}, \qquad (2)$$

где $\left\{Tm^{j}_{g}\right\}$ – множество, элементами которого является время выполнения j-го маршрута при осуществлении общего количества поставок по данному маршруту g.

Максимальное количество пунктов доставки, входящих в маршрут, определяется по формуле:

$$clp = \max_{j}\left\{\left[\frac{\max\limits_{g}\left\{Tm^{j}_{g}\right\}}{\min\limits_{g}\left\{Tp^{j}_{g}\right\}+\min\limits_{g}\left\{Td^{j}_{g}\right\}}\right]\right\}, \qquad (3)$$

где $\left\{Tp^{j}_{g}\right\}$ – множество, элементами которого является время простоя по j-му маршруту при осуществлении общего количества поставок по данному маршруту g;

$\left\{Td^{j}_{g}\right\}$ – множество, элементами которого является время движения по j-му маршруту при осуществлении общего количества поставок по данному маршруту g.

h – шаг дискретизации времени $t_k = t_0 + k\cdot h$, $k=\overline{1,M}$.

Суммарные затраты топлива за период определяются как сумма затрат топлива всех транспортных средств парка. Затраты топлива авто являются суммой затрат по

всем выполненным им маршрутам за период. Затраты по маршруту составляются как сумма затрат по транспортным путям. Затраты топлива P при выполнении доставки по транспортному пути являются функцией, зависящей от веса перевозимого груза в текущий момент времени. Таким образом, суммарные затраты топлива за период вычисляются по формуле:

$$P = \sum_{i=1}^{ka}\sum_{j=1}^{clm}\sum_{l=1}^{clp}\sum_{k=0}^{M}(\upsilon^{i}_{j\,l,l+1}(t_k)\cdot Np_{jl,l+1}{}^{i}(G_{jl,l+1}{}^{i}(t_k))\cdot X^{i}_{j\,l,l+1})\cdot h \to \min_{X}, \quad (4)$$

где $Np_{jl,l+1}{}^{i}(t_k)$ – затраты топлива i-го автомобиля при выполнении доставки по j-му маршруту $(l,l+1)$ транспортному пути в текущий момент времени.

Общее время выполнения маршрутов транспортными средствами за период формируется как сумма показателей времени выполнения маршрутов всех авто при обслуживании заказов клиентов. Время выполнения маршрута находится как сумма простоя, затраченного в каждом пункте маршрута, которое состоит из времени ожидания обслуживания и времени обслуживания, описывающиеся некоторыми функциями времени $Tog^{i}_{j\,l,l+1}(t)$ и $Tobs^{i}_{j\,l,l+1}(t)$, и времени движения по дороге $Td^{i}_{j\,l,l+1}(t)$. Для нахождения общего времени выполнения маршрутов транспортных средств Tm за период получено выражение:

$$Tm = \sum_{i=1}^{ka}\sum_{j=1}^{clm}\sum_{l=1}^{clp}\sum_{k=0}^{M}((Td^{i}_{j\,l,l+1}(t_k) + Tog^{i}_{j\,l}(t_k) + Tobs^{i}_{j\,l}(t_k))\cdot X^{i}_{j\,l,l+1})\cdot h \to \min_{X}, \quad (5)$$

где $Td^{i}_{j\,l,l+1}(t_k)$ – функция времени движения i-го автомобиля при выполнении доставки по j-му маршруту из l пункта в пункт $l+1$ в момент времени t_k;

$Tog^{i}_{j\,l}(t_k)$ – функция времени ожидания обслуживания i-го автомобиля при выполнении доставки по j-му маршруту в l пункте в момент времени t_k.

$Tobs^{i}_{j\,l}(t_k)$ – функция времени обслуживания i-го автомобиля при выполнении j-го маршрута в l пункте.

Рассмотрим основные ограничения для данной задачи.

Каждый клиент должен быть обслужен только одним транспортным средством. Переменные $X^{i}_{j\,l,l+1}$ принимают значения {0, 1}, что означает: 1 – i-й автомобиль движется от вершины l к вершине $l+1$ при выполнении j-го маршрута, 0 – при отсутствии движения.

$$\sum_{j=1}^{clm}\sum_{l=1}^{clp} X^{i}_{j\,l,l+1} = 1,\ \forall u^{l} \in U,\ l = \overline{1,clp} \quad (6)$$

где U – множество клиентов.

Вес $qm^{i}_{j}(t_k)$ и объем перевозимого груза $qv^{i}_{j}(t_k)$ i-м автомобилем при выполнении j-го маршрута в текущий момент времени t_k не должны превышать грузоподъемности gr^{i} и доступного объема кузова Va^{i}:

$$qm^{i}_{j}(t_k) = \sum_{j=1}^{clm}\sum_{l=1}^{clp} Mz_{l+1} X^{i}_{j\,l,l+1}(t_k) < gr^{i}, \quad (7)$$

$$qm^{i}_{j}(t_k) = \sum_{j=1}^{clm}\sum_{l=1}^{clp} Vz_{l+1} X^{i}_{j\,l,l+1}(t_k) < Va^{i}, \quad \forall r^{i} \in R,\ i = \overline{1,ka},$$

где R – множество транспортных средств автопарка.

Время прибытия соответствующего автомобиля к определенному клиенту $tp^i_{j_l}$ должно быть в пределах временного окна $[a_l, b_l]$:

$$a_l < tp^i_{j_l} < b_l,\ i = \overline{1, ka},\ k = \overline{1, M}$$
$$qV^i_j(t_k) < Va^i. \tag{8}$$

$[a_l, b_l]$ – промежуток времени, так называемое временное окно, в течение которого должен быть обслужен клиент.

Вес i-го автомобиля $qm^i_{j_{l,l+1}}$ при выполнении j-го маршрута в текущий момент времени t_k при выполнении доставки по $(l, l+1)$ дороге не должны превышать максимально допустимого веса проезжающего транспортного средства $md_{l,l+1}$ по пути $(l, l+1)$:

$$qm^i_{j_{l,l+1}}(t_k) < md_{l,l+1},\ \forall i = \overline{1, ka},\ j = \overline{1, clm},\ l = \overline{1, clp},$$
$$k = \overline{1, M} \tag{9}$$

где cld – число пунктов доставки, обслуживаемые по i-м автомобилем при выполнении j-го маршрута.

Время выполнения j-го маршрута i-м транспортным средством не должно превышать 8 часов:

$$Tm^i_j < 8,\ i = \overline{1, ka},\ j = \overline{1, clm}; \tag{10}$$

Скорость движения i-го автомобиля $\upsilon e^i_{j_{l,l+1}}$ в текущий момент времени t_k не должна превышать ограничения скорости движения транспорта $\upsilon c_{l,l+1}$ по транспортному пути $(l, l+1)$:

$$\upsilon e^i_{j_{l,l+1}}(t_k) < \upsilon c_{l,l+1}(t_k),\ k = \overline{1, M},\ i = \overline{1, ka},\ j = \overline{1, clm},$$
$$l = \overline{1, clp}. \tag{11}$$

Применим аппарат эволюционных алгоритмов для решения многокритериальной оптимизационной задачи (1), (4), (5) с ограничениями (6) – (11).

Рассмотрим основные этапы эволюционного алгоритма, состоящих из таких операторов: инициализации (создание начальной популяции определенного размера), кроссинговера и мутации для создания потомков.

Для эффективной работы алгоритма необходим простой и удобный способ кодирования решения. Представим решение в виде набора маршрутов транспортных средств, где количество маршрутов совпадает с количеством транспортных средств, а каждый маршрут представлен в виде набора клиентов, которые последовательно обслуживает данный автомобиль. Каждый маршрут начинается и заканчивается клиентом номер 0 – складом. Каждый клиент – пункт доставки описывается следующими переменными:

$tp^i_{j_l}$ – время прибытия i-го автомобиля в l-й пункт j-го маршрута;

$Tog^i_{j_l}(tp^i_{j_l})$ – время ожидания разгрузки i-го автомобиля в l-м пункте j-го маршрута, зависящее от времени прибытия;

$Tobs^i_{j_l}(tp^i_{j_l})$ – время обслуживания i-го автомобиля в l-м пункте j-го маршрута, которое является функцией времени;

$to^i_{j_l}$ – время отправления i-го автомобиля из l-го пункта j-го маршрута;

$Mz^i_{j_l}$ – вес разгружаемого груза i-м автомобилем в l-м пункте j-го маршрута;

$Qmz^i_{j_l}$ – вес возврата, полученного груза i-м автомобилем в l-м пункте j-го маршрута;

$Vz^i_{j_l}$– объем разгружаемого груза i-м автомобилем в l-м пункте j-го маршрута;

$Qvz^i_{j_l}$ – объем возвращаемого клиентом груза i-м автомобилем в l-м пункте j-го маршрута;

$R^i_j(t_k)$ – длина пути, пройденного i-м автомобилем при выполнении j-го маршрута в момент времени t_k;

$Tp^i_j(t_k)$ – общее время простоя i-го транспортного средства при выполнении j-го маршрута к данному моменту времени.

Представление решения в виде маршрутов удобно для описанных ниже операторов кроссинговера и мутации.

Оператор инициализации генерирует новые цепочки хромосом, которые являются частью общей популяции. Применим метод Соломона для конструирования начальной популяции. Алгоритм состоит из таких этапов:

Осуществляем проверку: если все пункты обслужены, то осуществляем переход на 5, иначе – переход к пункту 2.

1. Выбираем пункт l^* из числа не обслуженных клиентов, для этого рандомно задаем число в переделах от 1 до n – количество пунктов обслуживания.

2. Осуществляем перебор всех пунктов имеющегося решения для вставки пункта l^* в имеющийся маршрут текущего решения. Если такие допустимые вставки существуют, выбираем ту, в которой добавочное расстояние с появлением нового пункта l^* меньше. Если существует две вставки с одинаковым добавочным расстоянием, то выбираем ту, у которой общее время простоя машины.

3. Если допустимых вставок в имеющиеся маршруты текущего решения не существует, то начинаем новый маршрут, в который помещаем элемент l^* и переход к пункту 1.

4. Все клиенты обслужены, решение найдено. Выход.

Особенностью данного оператора инициализации заключается в том, что имеется возможность не только строить новое решение на этапе инициализации, но и в дальнейшем на этапах применения операторов кроссинговера и мутации достраивать решения.

Оператор кроссинговера (скрещивания) предназначен для получения новых решений на основе тех, что находятся в данный момент в популяции, таким образом, чтобы закрепить в потомках удачные маршруты решений родителей. Он получает на вход две или более хромосом, на выходе выдает комбинированное решение, которое построено на основе входных решений. Самым распространенным видом кроссовера является N-точечный кроссовер. Как показали эксперименты, алгоритм дает наилучшие результаты при $N=3$.

1. Выбираем N решений из популяции, применяя оператор селекции – отбор усечением.

2. Объединим все решения в одно множество маршрутов.

3. Пока в объединенном решении множества маршрутов есть маршруты, проводим следующие операции:

– выбираем маршрут и вставляем его в новое решение, для этого берется случайное число в пределах от 0 до N, указывающее на номер маршрута в объединенном решении;

– исключаем выбранный маршрут из объединенного решения;

– исключаем из объединенного решения все маршруты, в которых есть пункты из выбранного решения.

4. Добавляем не обслуженные пункты в новое решение, используя оператор инициализации.

5. Новое решение является потомком выбранных k решений родителей.

Преимуществом приведенного оператора кроссинговера является то, что допустимое решение не требует дальнейшей обработки.

Оператор мутации предназначен для вывода популяции из локального оптимума. Он получает на вход хромосому и с некоторой вероятностью инвертирует часть ее генов.

Пусть имеется некоторое решение задачи, к которому применим оператор мутации, состоящий из таких этапов:

1) задается L число удаляемых пунктов доставки;

2) исключаем L пунктов из решения, выбирая таковых вероятностным образом;

3) добавляем заново L пунктов из удаленных маршрутов в решение с использованием оператора инициализации.

В результате проведения тестирования разработанного генетического алгоритма было обнаружено, что общее пройденное расстояние автомобилями и время выполнения ими маршрутов близко к оптимальному решению, полученного с применением одного из точных методов, а именно метода ветвей и границ для решения задачи формирования транспортных маршрутов, и отклонение от такового не превышает 7%, что свидетельствует об эффективности применения представленного алгоритма к решению данной транспортной задаче.

Выводы

В данной работе предлагается алгоритм для решения задачи автоматизации формирования транспортных маршрутов, который позволяет учитывать нестационарность дорожно-транспортной ситуации и параметры обслуживания транспортного средства в точках останова по маршруту.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые разработан эволюционный алгоритм, работа которого основана на динамической аналитической модели, позволяющий при прогнозе показателей транспортных маршрутов учитывать изменение дорожно-транспортной ситуации и характеристик процесса доставки заказов.

Данный алгоритм формирования транспортных маршрутов может быть использован при разработке автоматизированной системы планирования доставки заказов клиентам.

Практическое применение результатов работы даст возможность сократить логистические затраты на доставку заказов и повысить эффективность обслуживания клиентов за счет учета при формировании маршрутов нестационарности, присущей процессу транспортировки грузов.

Литература

1. Смехов А.А. Маркетинговые модели транспортного рынка / Смехов А.А. – М. : Транспорт, 1998. – 120 с.
2. Неруш Ю.М. Снабжение и транспорт: эффективное взаимодействие / Неруш Ю.М. – М. : Экономика, 2006. – 340 с.

3. Геронимус Б.Л. Совершенствование планирования на автомобильном транспорте / Геронимус Б.Л. – М. : Транспорт, 1985. – 200 с.
4. Покровский А.К. Исследование систем управления в транспортной отрасли / Покровский А.К. – М. : Финансы и статистика, 2010. – 280 с.
5. Шереметьева Е.Г. Применение геоинформационных технологий Network Analyst для решения транспортных задач (итоги 5-й Международ. конф. „НКПМ-2001") [Электронный ресурс] / Е.Г. Шереметьева // Библиотечный вестник – 2001. – № 15. – С. 78. – Режим доступа к журн.: http://www.dataplus.ru/articles/2001/39klik.htm.
6. Романовский В.И. Математические модели системы ANTOR LogisticsMaster (итоги 6-й Международ. конф. «НКПМ-2002») [Электронный ресурс] / В.И. Романовский // Библиотечный вестник. – 2002. – № 16. – С. 25. – Режим доступа к журн.: http://www.dataplus.ru/articles/2002/43klik.htm.
7. Смирнов М.И. Математические модели, используемые в системе оптимизации доставки товаров автотранспортом «Диспетчер» (итоги 7-й Международ. конф. «НКПМ-2003») [Электронный ресурс] / М.И. Смирнов, Р.З. Хайруллин, // Библиотечный вестник. – 2003. – № 17. – С. 65. – Режим доступа к журн. : http://www.dataplus.ru/articles/2003/53klik.htm.

Literatura

1. Smehov A.A. Marketingovye modeli transportnogo rynka. M.: Transport. 1998.120 s.
2. Nerush Ju.M. Snabzhenie i transport: jeffektivnoe vzaimodejstvie. M.: Jekonomika. 2006. 340 s.
3. Geronimus B.L. Sovershenstvovanie planirovanija na avtomobil'nom transporte. M.: Transport. 1985. 200 s.
4. Pokrovskij A.K. Issledovanie sistem upravlenija v transportnoj otrasli. M.: Finansy i statistika. 2010. 280 s.
5. Sheremet'eva E.G. Bibliotechnyj vestnik. 2001. № 15. S. 78. http://www.dataplus.ru/articles/2001/39klik.htm.
6. Romanovskij B.I. Bibliotechnyj vestnik. 2002. №16. S. 25. http://www.dataplus.ru/articles/2002/43klik.htm.
7. Smirnov M.I. Bibliotechnyj vestnik. 2003. №17. S. 65. http://www.dataplus.ru/articles/2003/53klik.htm.

A.A. Sheptura, K.U. Kuzichkina

Evolutionary Algorithm for Solving the Problem of Automated Transport Routes

This article discusses one of the pressing problems, which is namely improving the organization of the delivery orders by automated planning and management of transport routes. Evolutionary algorithm based on dynamic analysis model, which allows taking into account changes in road traffic conditions and characteristics of the delivery orders at the forecast performance of transport routes, is proposed. This algorithm will improve the planning of transport routes significantly. Practical importance of the work includes improving of transport routes planning due to possibility of dynamic forecasting for the major indicators of delivery orders. The results can be used for creation of the automated system of planning transportation routes.

Статья поступила в редакцию 08.08.2011.